

بررسی تأثیر تقویت‌کننده بر ظرفیت کمانشی مخازن جدارنازک فولادی بدون سقف تحت اثر نشست موضعی

Original Article

حمید ناصری (دکتری)

حسین شوکتی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

مخازن فولادی جدارنازک در صنایع مختلف برای ذخیره‌سازی نفت و میعانات گازی استفاده می‌شوند. این مخازن با متراکم کردن بستر زیرین بر روی فونداسیون تکیه داده می‌شوند. این بستر تکیه‌گاهی ممکن است در قسمتی از فونداسیون مخازن به دلایل غیریکنواختی هندسه یا عدم تراکم مناسب خاک زیر فونداسیون یا توزیع غیریکنواخت بار اعمالی به فونداسیون قدرت باربری خود را از دست دهد و دچار نشست شود. نشست‌های محتمل شامل نشست یکنواخت، نشست از نوع کج‌شدگی و نشست غیریکنواخت است. نشست موضعی غیریکنواخت دیواره‌ی مخزن یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین نوع نشست‌های مخازن است. در این تحقیق اثر نشست موضعی بر میزان ظرفیت کمانشی در مخزن با و بدون تقویت‌کننده مورد بررسی آزمایشگاهی و عددی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تقویت‌کننده نقش مؤثری در افزایش پارامترهای چقرمگی، بیشینه‌ی بار معادل و سختی اولیه دارد. به طوری که باعث افزایش ۹۸ درصدی چقرمگی، ۵۸ درصدی بیشینه‌ی بار معادل و ۱۰۱ درصدی سختی اولیه می‌شود. هم‌چنین حضور تقویت‌کننده، نقش بسیار مهمی در کنترل تغییر مکان‌های شعاعی دارد. به طوری که با جلوگیری از تغییر مکان شعاعی لبه‌ی بالایی باعث افزایش ظرفیت کمانشی و پس‌کمانشی مخازن می‌شود.

واژگان کلیدی: مخازن جدارنازک، نشست موضعی، ظرفیت کمانشی، حلقه‌ی تقویتی، تغییرمکان شعاعی.

h.naseri@urmia.ac.ir
h.showkati@urmia.ac.ir

۱. مقدمه

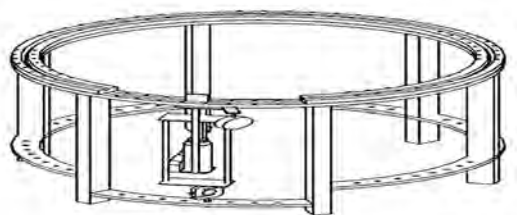
- تنش‌های شدید در کف مخزن
- مخازن فولادی جدارنازک در صنایع مختلف برای ذخیره‌سازی نفت و میعانات گازی استفاده می‌شود. نسبت شعاع به ضخامت در این مخازن در حدود ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ است و نسبت ارتفاع به شعاع در حدود ۵/۰ تا ۳ است. بسته به حجم مخازن از انواع مختلف مخزن با اشکال هندسی و دارای سقف و بدون سقف برای ذخیره استفاده می‌شود. این مخازن از طریق تکیه‌گاه‌هایی به زمین تکیه داده می‌شوند که به دلایل غیریکنواختی هندسه یا عدم تراکم مناسب خاک زیر فونداسیون یا توزیع غیریکنواخت بار اعمالی به فونداسیون ممکن است در بعضی از نقاط زیر مخزن قدرت باربری خود را از دست بدهند و دچار نشست شوند. نشست پی مخازن می‌تواند نتایج مخرب زیر را به بار بیاورد.^[۱-۳]
- تغییر مکان‌های خارج از صفحه و ایجاد کمانش و گسیختگی در دیواره‌ی مخزن
- تنش‌های شدید در پایه‌ی فونداسیون و در محدوده‌ی نشست

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۶/۵، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۷، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

DOI:10.24200/J30.2021.56398.2824

انواع نشست‌هایی که در مخازن به وجود می‌آید شامل نشست یکنواخت، نشست از نوع کج‌شدگی و نشست غیریکنواخت (موضعی) است.^[۴-۵] نشست یکنواخت به لحاظ مقدار، بزرگ‌ترین نوع نشست است. این نشست به صورت انتقال صلب است و تأثیری بر ایمنی سازه نخواهد داشت. نوع دوم نشست می‌تواند کج‌شدگی مخزن از حالت اولیه باشد و زمانی که مقدار آن به حالت بحرانی برسد می‌تواند تأثیرات مخرب بر روی مخزن داشته باشد. سومین نوع نشست، جابه‌جایی در راستای قائم قسمتی از دیواره‌ی مخزن است (شکل ۱). این نوع نشست می‌تواند تأثیرات مخربی بر روی مخازن داشته باشد. با این‌که این نشست به لحاظ اندازه در مقایسه با نشست‌های دیگر کوچک‌تر است، می‌تواند باعث ایجاد جابه‌جایی‌های شعاعی بیش‌از حدی در مخازن شود. مقدار نشست در مقابل تأثیر آن بر سازه دارای اهمیت کمتری است. نشست‌های کم با الگوی خاص می‌تواند تأثیرات مخربی بر روی مخزن داشته باشد. نشست موضعی می‌تواند در محدوده‌های متنوعی از محیط پیرامونی مخزن



شکل ۲. نمای دستگاه اعمال نشست.

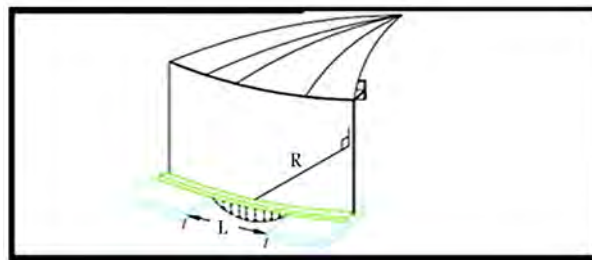
در محدوده‌های نشست کوچک نسبت به محدوده‌های نشست بزرگ به فشار هیدرواستاتیک حساس‌تر است. هم‌چنین ارتفاع بحرانی سیال با افزایش محدوده‌ی نشست افزایش می‌یابد. [۱۳، ۱۴، ۱۵] چن^۷ و همکارانش در سال (۲۰۲۰) بر اساس نتایج اجزای محدود، معادله‌ی رگرسیون برای پیش‌بینی بیشینه‌ی جابه‌جایی شعاعی مخزن تحت نشست غیریکنواخت ارائه دادند. [۱۴]

از بین انواع نشست‌هایی که در مخازن می‌تواند رخ دهد، اهمیت نشست موضعی نسبت به انواع دیگر نشست‌ها بیشتر است. نشست موضعی با توجه به محدوده‌ی تأثیر می‌تواند تأثیرات زیادی بر روی عملکرد مخزن داشته باشد. پس ضرورت ایجاد می‌کند که تأثیر نشست موضعی بر رفتار هندسی و فیزیکی مطالعه شود. هم‌چنین مطالعات آزمایشگاهی کافی در رابطه با تأثیر نشست موضعی بر ظرفیت باربری مخازن وجود ندارد. [۱۶، ۱۵] تنها مطالعه‌ی صورت‌گرفته در این زمینه توسط گودی انجام شده است. [۸] تفاوت عمده‌ی تحقیقات او با این تحقیق در نوع مخزن و نحوه‌ی اعمال نشست و هم‌چنین تعیین میزان ظرفیت کماتشی است. با بررسی آیین‌نامه‌های مختلف از جمله API 653-1 و EEMUA-159 می‌توان دریافت که هنوز مطالعات چندین جامع آزمایشگاهی و تحلیلی نیز برای بررسی موضوع نشست موضعی و ارائه‌ی روابط کامل انجام نگرفته است. [۱۰-۵] از این رو با توجه به ضرورت‌های اشاره شده، هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیر حضور تقویت‌کننده بر ظرفیت کماتشی مخازن با استفاده از روش آزمایشگاهی و اجزای محدود است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

در پوسته‌های جدارنازک استوانه‌یی تحت نشست موضعی مهم‌ترین قیدهای تکیه‌گاهی، قید شعاعی و قید عمودی رو به پایین هستند؛ زیرا سازه‌ی تحت این نوع بار تمایل به افزایش یا کاهش قطر و تغییر شکل لبه‌ها به سمت پایین دارد. طی بررسی‌های صورت‌گرفته معلوم شد شرایط تکیه‌گاهی مناسب است که لبه‌ی پوسته در جهت شعاعی و در جهت عمودی به سمت پایین کاملاً از نظر جابه‌جایی مقید شود. برای پیاده‌سازی این ایده، مدل‌سازی‌های اولیه‌ی عددی از سیستم آزمون و پوسته‌های استوانه‌یی مورد آزمایش در محیط نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته و پس از تحلیل‌های صورت گرفته هندسه‌ی کلی سیستم آزمون مشخص و جنس مصالح مورد نیاز جهت ساخت تعیین شد (شکل ۲).

دستگاه متشکل از قطعات ماشین‌کاری شده برای ایجاد تکیه‌گاه و نصب مخزن است. بر روی این قطعات شیاری برای قرارگیری نمونه ایجاد شده است. این قطعات بر روی دو حلقه که به فاصله‌ی مشخص از هم قرار دارند با پیچ متصل شده‌اند. مجموعه‌ی قطعات و حلقه‌ها بر روی ۶ پایه‌ی صلبی سوار شده است. در فواصل بین این پایه‌ها صفحات دارای سوراخ برای نصب لودسل و سیستم جک هیدرولیکی متصل شده است. جک هیدرولیکی ۱۰ تنی به منظور اعمال نیرو در محدوده‌ی



شکل ۱. نشست موضعی جداره‌ی مخزن.

اتفاق بیافتد. کماتش جداره مهم‌ترین نوع خرابی مخازن در نشست‌های غیریکنواخت است. این موضوع بیانگر اهمیت بررسی رفتار مخازن و کماتش جداره تحت نشست موضعی و اعمال پیش‌بینی‌های لازم برای جلوگیری از آن است.

پالمرو^۱ (۱۹۹۴) در بررسی رفتار مخازن تحت اثر نشست موضعی به این نتیجه دست یافت که بیشینه‌ی تنش تحت نشست موضعی در مخازن بدون مهاربند در حدود یک‌دهم بیشینه‌ی تنش در مخازن با مهاربند است. بنا بر این، برای مخازن بدون مهاربند با سقف شناور، تغییرمکان‌های خارج از صفحه را به عنوان معیار طراحی بحرانی در نظر گرفت. [۶] هورنانگ^۲ و همکاران (۱۹۹۷)، مطالعات گسترده‌یی را در مورد مخازن بدون مهاربند تکیه‌گاهی انجام دادند که نشان می‌داد که هنگامی که پوسته از سطح خاک جدا می‌شود تنش‌های محوری به‌طور سریع پراکنده می‌شود. در این مطالعه از پروفیل‌های نشست به عنوان داده استفاده کردند. [۷]

گودی^۳ و همکارانش در سال (۲۰۰۳) در مقاله‌یی به بررسی اثر نشست تکیه‌گاهی موضعی در مخازن ذخیره‌ی جدارنازک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تفاوت بین مقادیر نشست به‌دست آمده از تحلیل غیرخطی و تحلیل کماتش بستگی به مقدار محدوده‌ی اعمال نشست دارد. در محدوده‌ی نشست کوچک، تفاوت مقادیر این دو تحلیل بیشتر است ولی برای مقادیر محدوده‌ی اعمال نشست بالای ۴۰ درجه تفاوت بین این دو تحلیل کمتر می‌شود. [۸] هولست^۴ و همکارانش (۲۰۰۵) پوسته‌های استوانه‌یی تحت اثر بلندشدگی و بارمحوری فشاری را بررسی کردند. نتایج تحقیقات ایشان به‌صورت زیر است: هنگامی‌که بارمحوری فشاری هم‌زمان با بلندشدگی بر مخزن اعمال می‌شود دو حالت زیر باید در نظر گرفته شود: حالت اول بلندشدگی زیر بحرانی که هنوز موج V شکل اتفاق نیفتاده است و حالت دوم بلندشدگی فوق بحرانی که موج V شکل اتفاق افتاده و از لحاظ عمق و اندازه در حال رشد است. برای حالت بلندشدگی زیر بحرانی فشار محوری یکنواخت سریعاً منجر به تشکیل موج‌های V کوچک می‌شود. حالت کماتش کلی از توزیع این حالات آغاز می‌شود. یک مقدار جزئی بلندشدگی منجر به کاهش بسیار زیاد مقاومت کماتشی می‌شود. برای حالت بلندشدگی فوق بحرانی فشار محوری یکنواخت باعث رشد و گسترش مودها و تشکیل دومین موج می‌شود. کماتش کلی مخزن با گسترش موج‌ها و توزیع آن‌ها اتفاق می‌افتد. مقاومت کماتشی با افزایش عمق موج‌ها کاهش می‌یابد. [۹]

ژاو^۵ و همکارانش در سال (۲۰۱۱) پایداری مخازن دارای سقف شناور تحت نشست غیریکنواخت کلی و موضعی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای مخازن تحت نشست کلی، کماتش موضعی در حلقه‌ی تقویتی رخ می‌دهد که منجر به رفتار پایداری کماتش می‌شود و شکست نهایی با کماتش کلی پوسته‌ی مخزن اتفاق می‌افتد در حالی‌که برای مخازن تحت نشست موضعی، پاسخ سازه‌یی به محدوده‌ی نشست بستگی دارد. [۱۰] گونگ^۶ و همکارانش در سال (۲۰۱۳) تأثیر فشار هیدرواستاتیکی بر رفتار کماتشی مخازن ذخیره‌ی تحت نشست تکیه‌گاهی موضعی را بررسی کردند. آنها به این نتیجه دست یافتند که میزان نشست بحرانی

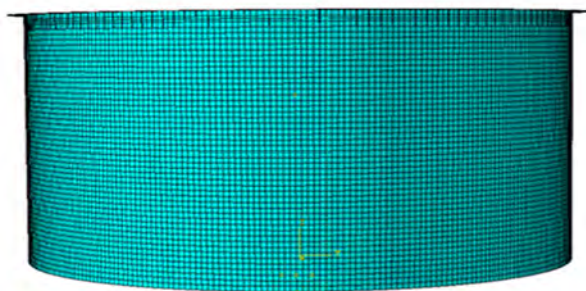
جدول ۱. مشخصات مکانیکی و هندسی مخازن ساخته شده.

نوع مخزن	ابعاد تقویت کننده	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	L/R	R/t
با تقویت کننده	۳۰ × ۳۰ × ۶	۲۰۰	۰/۳	۱	۵۰۰
بدون تقویت کننده	-	۲۰۰	۰/۳	۱	۵۰۰

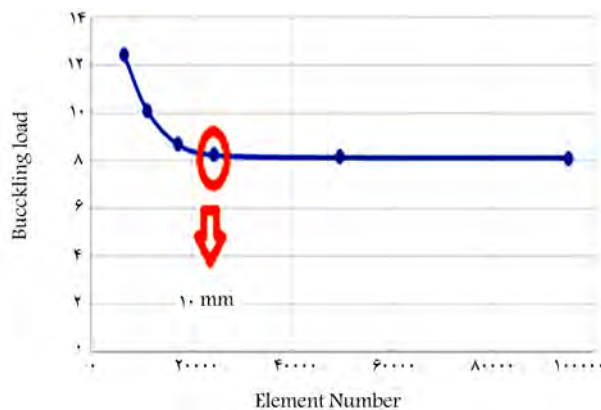
۳. تحلیل نشست مخازن با استفاده از نرم افزار اجزای محدود (آباکوس)

به منظور مدل سازی مخزن و اعمال نشست ها به آن از نرم افزار اجزای محدود آباکوس^۸ استفاده شده است. نمونه های مدل سازی شده به صورت پوسته ای استوانه ای دارای ارتفاع $L(mm)$ ، شعاع $R(mm)$ و ضخامت دیواره $t(mm)$ هستند. ابعاد انتخاب شده برای ارتفاع، شعاع و ضخامت مدل ها، نسبت شعاع به ضخامت (R/t) و نسبت ارتفاع به شعاع (L/R) را که مقیاس مناسبی از شرایط واقعی است، ارائه می دهد. در مدل سازی دیواره ی پوسته ای استوانه ای فلزی و تقویت کننده از جزء S4R استفاده شده است. این جزء یک جزء پوسته ای چهار نقطه ای دو انحنایی است که قابلیت تحلیل کرنش های بزرگ را دارد و هر گره از جزء ۶ درجه آزادی (۳ درجه انتقالی و ۳ درجه دورانی) دارد. هم چنین طول ساق تقویت کننده که به صورت نبشی است، برابر ۳۰ میلی متر با ضخامت ۶ میلی متر است. شکل (۵) شکل ترسیمی نمونه های مورد نظر در محیط ABAQUES را نشان می دهد. برای سهولت کار در مراحل مدل سازی و بهره گیری از نتایج، از دستگاه مختصات استوانه ای استفاده شده است.

تحلیل حساسیت به اندازه ی مش بر روی پوسته ای استوانه ای انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل،



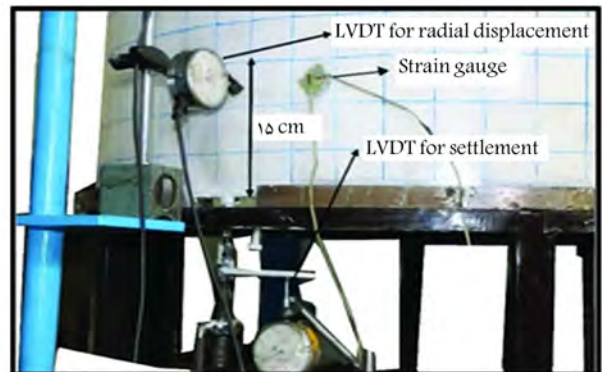
شکل ۵. مدل اجزای محدود مخازن.



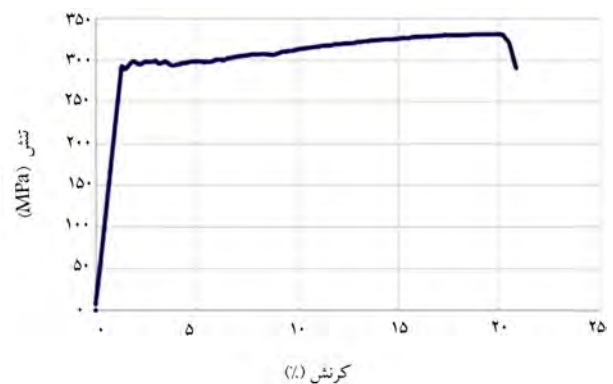
شکل ۶. تحلیل حساسیت مش.

اعمال نشست استفاده می شود. مقدار محدوده یی که در آن نشست اعمال می شود، برابر ۱۵ سانتی متر است. لودسل با ظرفیت ۱۰ تن به منظور اندازه گیری نیروی اعمالی بر روی جک هیدرولیکی نصب می شود. جابه جایی سنج (LVDT) برای اندازه گیری میزان نشست استفاده می شود. روش اجرایی دستگاه بدین صورت است که با اعمال فشار بر اهرم جک، کورس جک باز شده و با استفاده از سازوکار طراحی شده که جک داخل آن قرار گرفته است، نیروی فشاری جک به نیروی کششی تبدیل می شود. این سازوکار توسط ورقه یی به مخزن مورد آزمایش متصل شده است که نیروی کششی جک، مخزن را تحت کشش قرار می دهد و اعمال نشست می کند. میزان این نشست توسط جابه جایی سنج اندازه گیری می شود و نیروی وارد شده از طرف جک نیز توسط نیروسنج اندازه گیری و توسط ثبت کننده داده در سیستم رایانه ای ذخیره می شود. محل نصب جابه جایی سنج برای اندازه گیری تغییر مکان شعاعی بر روی بدنه در شکل (۳) نشان داده شده است.

نمونه ی مخزن آزمایشگاهی از جنس ورق فولادی گالوانیزه طبق مشخصات ارائه شده در جدول ۱ به وسیله ی جوش CO₂ در کارگاه ساخته شد و بعد از رنگ آمیزی برای تشخیص نقاط اندازه گیری جابه جایی شعاعی مش بندی شد. نمودار تنش کرنش مربوط به ورق گالوانیزه مورد استفاده در ساخت مخازن در شکل ۴ آمده است.



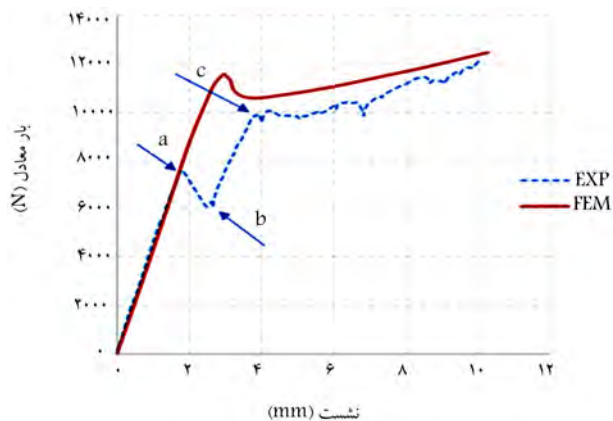
شکل ۳. جزئیات و محل نصب ابزار اندازه گیری.



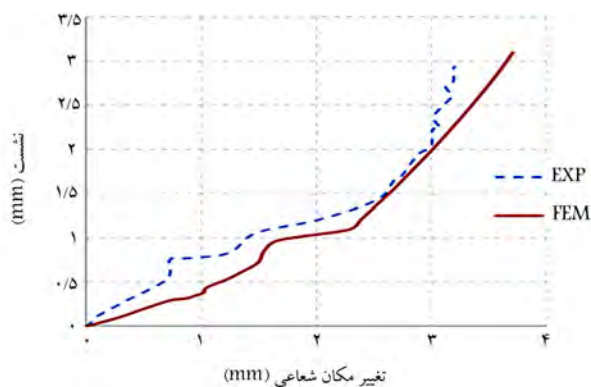
شکل ۴. نمودار تنش کرنش ورق های مورد استفاده در ساخت مخازن.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج سختی اولیه، بیشینه‌ی بار معادل و چقرمگی برای نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده.

نوع روش	چقرمگی ($N.mm$)	بیشینه‌ی بار معادل (N)	سختی اولیه (N/mm)
اجزای محدود	۹۷۸۸۷	۱۳۰۶۳	۴۰۶۹
آزمایشگاهی	۸۸۵۷۳/۷	۱۳۰۳۵	۴۱۱۱



شکل ۷. نمودار بار معادل - نشست مخزن بدون تقویت‌کننده.



شکل ۸. نمودار نشست - تغییر مکان شعاعی مخزن بدون تقویت‌کننده.

به دست آمده است که مقدار تحلیل عددی ۵/۱۰٪ نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. میزان بار بیشینه‌ی معادل به دست آمده به روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب ۱۳۰۶۳ و ۱۳۰۳۵ (N) است که مقدار تحلیل عددی ۲۱/۰٪ نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. هم‌چنین میزان سختی اولیه برای روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۴۰۶۹ و ۴۱۱۱ (N/mm) به دست آمده است که مقدار تحلیل عددی ۱٪- نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. با دقت در نتایج می‌توان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین روش آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. تغییر شکل نهایی نمونه برای دو روش عددی و آزمایشگاهی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که از تصاویر به وضوح مشخص است روش مدل‌سازی به لحاظ مود تغییر شکل نیز کاملاً بر نتایج آزمایشگاهی منطبق است که دلیلی مبنی بر انجام مدل‌سازی منطبق بر روش آزمایشگاهی است.

۲.۴. مخزن با تقویت‌کننده

مشخصات این نمونه دقیقاً شبیه مخزن بدون تقویت‌کننده است. با این تفاوت که تقویت‌کننده‌ی از مقطع نبشی با طول ساق‌های مساوی ۳۰ میلی‌متر با ضخامت

۱۰ میلی‌متری به عنوان مناسب‌ترین نوع مش‌بندی در این پژوهش انتخاب شد. از تحلیل استاتیکی غیرخطی Riks برای بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌یی استفاده شده است. هم‌چنین برای بررسی شناخت مد کمانش و استفاده از آن برای اعمال ناکاملی‌های هندسی در تحلیل غیرخطی Riks، از تحلیل خطی کمانش (Buckling) استفاده شده است.^[۸] برای آنکه بتوان ظرفیت باربری مخازن را به دست آورد، به جای اعمال نشست، نیروی متناظر در آن محدوده اعمال می‌شود و تحلیل به صورت بار کنترل انجام می‌شود.

۴. بحث در نتایج

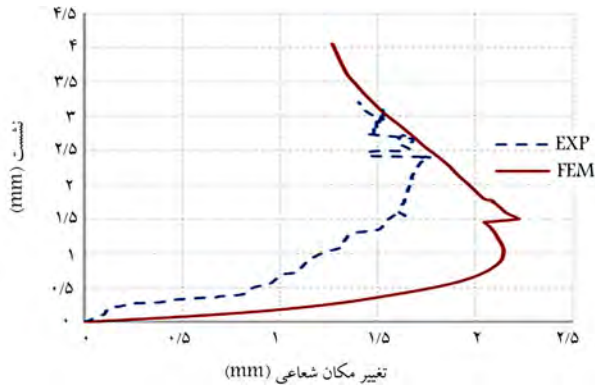
۴.۱. مخزن بدون تقویت

نمونه به صورت پوسته‌ی استوانه‌یی است که از ورق فولادی به ضخامت ۱ میلی‌متر به شعاع ۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. مقدار بازه‌ی نشست بر محیط مخزن در این نمونه برابر با ۵/۰٪ است. به منظور اعمال نیرو بر مخزن، ورق‌ی از جنس خود مخزن به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به مخزن با اتصال جوشی متصل می‌شود. سطح تماس ورق با مخزن در ابعاد ۳۰ × ۵۰ میلی‌متر است. به منظور اعمال نیرو، جک هیدرولیکی که دارای دسته‌ی فولادی است، در محل خود نصب شد. با افزایش نیرو، مقادیر نیروی معادل، نشست و تغییر مکان خارج از صفحه توسط لودسل و جابه‌جایی‌سنج‌ها برداشته و توسط دیتالاگر بر روی سیستم رایانه‌یی ذخیره می‌شود. در شروع بارگذاری رابطه‌ی بین نیروی معادل و نشست به صورت خطی پیش می‌رود. در نیروی معادل نشست حدود ۷۵۵۰ نیوتن (a) به علت لهیدگی لبه‌های مخزن در محل قرارگیری در شیار، مقدار نیرو با افت مواجه می‌شود (شکل ۷). با تشکیل موج در بدنه مقدار نیروی معادل نشست افزایش پیدا می‌کند و نمودار حالت سخت‌شوندگی مجدد به خود می‌گیرد (b). بعد از آن با توجه به گسترش موج در بدنه‌ی مخزن و هم‌چنین لهیدگی لبه‌های مخزن و اتکا آن به کناره‌های دستگاه آزمون، رفتار به حالت غیرخطی تبدیل می‌شود (c)؛ به طوری که به ازای افزایش کوچک در مقدار نیرو، مقدار نشست به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. با افزایش مقدار نشست، مقدار تغییر مکان خارج از صفحه نیز به طور فزاینده‌یی به طرف بیرون افزایش پیدا می‌کند (شکل ۸). به علت وقوع تغییر مکان‌های بیش از حد خارج از صفحه، بارگذاری متوقف و باربرداری انجام می‌شود. مشاهده شد که در حین آزمون و بعد از باربرداری هیچ‌گونه آسیبی به محل جوش ورق متصل به مخزن به منظور اعمال نیرو وارد نشده بود. تغییر مکان خارج از صفحه منجر به ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در لبه‌ی بالایی مخزن می‌شود و لبه‌ی بالایی از حالت دایروی خارج می‌شود و شکل بیضوی به خود می‌گیرد. هم‌چنین لبه‌ی پایینی مخزن نیز دچار تغییر شکل ماندگار می‌شود.

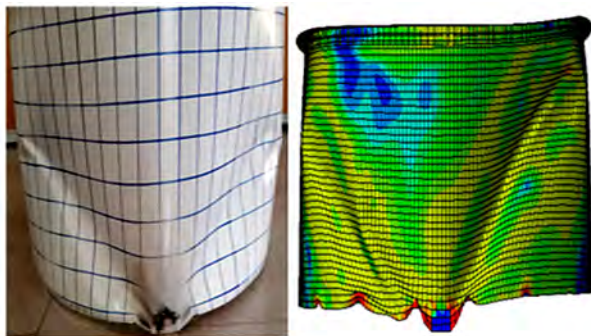
در جدول ۲ نتایج مستخرج از نمودار بار معادل - نشست شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این جدول میزان چقرمگی که برابر سطح زیر نمودار بار معادل نشست است، به روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب ۹۷۸۸۷ و ۸۸۵۷۳/۷ $N.mm$

جدول ۳. مقایسه نتایج سختی اولیه، بیشینه بار معادل و چقرمگی برای نمونه با تقویت کننده.

نوع روش	چقرمگی ($N.mm$)	بیشینه بار معادل (N)	سختی اولیه (N/mm)
اجزای محدود	۱۸۹۵۲۳	۲۲۴۷۵	۱۳۶۲۴
آزمایشگاهی	۱۷۵۴۲۵/۵	۲۰۶۴۸	۱۰۷۴۸



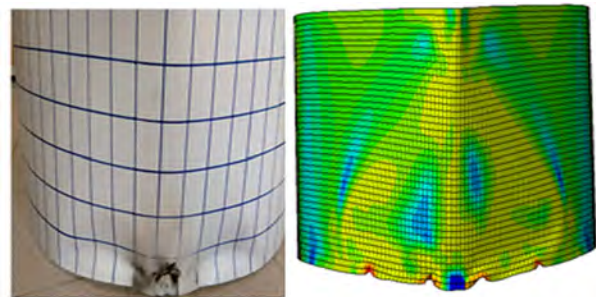
شکل ۱۰. نمودار نشست - تغییر مکان شعاعی مخزن با تقویت کننده.



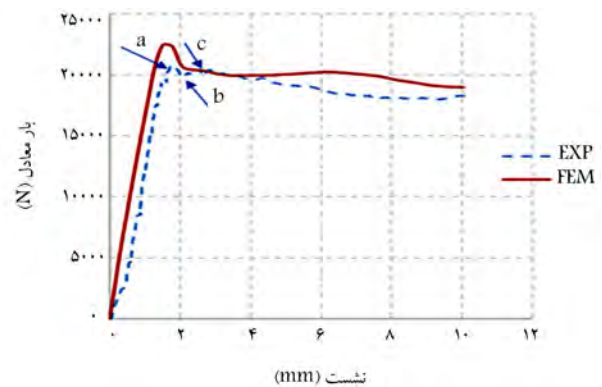
شکل ۱۱. تصویر تغییر شکل نهایی نمونه با تقویت کننده به روش عددی و آزمایشگاهی.

حالت اولیه خود برگشته است. لبه پایینی مخزن دچار تغییر شکل ماندگار می شود.

در جدول ۳ نتایج مستخرج از نمودار بار معادل - نشست شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به این جدول، میزان چقرمگی به دست آمده به روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب ۱۸۹۵۲۳ و ۱۷۵۴۲۵/۵ $N.mm$ است که مقدار به دست آمده از تحلیل عددی ۸٪ نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. میزان بار بیشینه معادل به دست آمده به روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب ۲۲۴۷۵ و ۲۰۶۴۸ (N) است که مقدار به دست آمده از تحلیل عددی ۸٪/۸ نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. همچنین میزان سختی اولیه برای روش عددی و آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۱۳۶۲۴ و ۱۰۷۴۸ (N/mm) است که مقدار به دست آمده از تحلیل عددی ۷/۲۶٪ نسبت به روش آزمایشگاهی اختلاف دارد. با دقت در نتایج می توان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین روش آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. تغییر شکل نهایی نمونه برای دو روش عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که از این تصاویر نیز به وضوح مشخص است روش مدل سازی به لحاظ مود تغییر شکل کاملاً بر نتایج آزمایشگاهی منطبق است که دلیلی مبنی بر انجام مدل سازی منطبق بر روش آزمایشگاهی است.



شکل ۹. تصویر تغییر شکل نهایی نمونه بدون تقویت کننده.



شکل ۱۰. نمودار بار معادل - نشست مخزن با تقویت کننده.

۶ میلی متر بر لبه بالایی مخزن متصل می شود. در شروع بارگذاری رابطه ی بین نیروی معادل و نشست به صورت خطی پیش می رود. در نیروی معادل نشست حدود ۲۰۴۷۵ نیوتن (a) به علت شروع کماتش و تشکیل موج، مقدار نیرو با افت مواجه می شود (شکل ۱۰). با تشکیل موج در بدنه مقدار نیروی معادل نشست افزایش می یابد و نمودار حالت سخت شوندهگی مجدد به خود می گیرد (b). بعد از آن با توجه به گسترش موج در بدنه ی مخزن و همچنین لهیدگی لبه های مخزن و اتکای آن به کناره های دستگاه آزمون، رفتار به حالت غیرخطی تبدیل می شود (c). با افزایش مقدار نشست مقدار تغییر مکان خارج از صفحه به طرف بیرون افزایش پیدا می کند؛ ولی به علت وجود تقویت کننده و جلوگیری از تغییر مکان های شعاعی لبه بالایی، موج تشکیل شده عریض تر می شود و تغییر مکان شعاعی در نقطه ی مورد نظر تغییر جهت می دهد و به سمت داخل افزایش پیدا می کند (شکل ۱۱). ورق تقویتی بالای مخزن باعث جلوگیری از بیضی شدگی بالای مخزن می شود و مقدار تغییر مکان خارج از صفحه در بالای مخزن را کاهش می دهد و باعث افزایش مقدار بار معادل نشست می شود. به علت نشست زیاد و احتمال پارگی ورق، بارگذاری متوقف و باربرداری انجام می شود. مشاهده شد که در حین آزمون و بعد از باربرداری هیچ گونه آسیبی به محل جوش ورق متصل به مخزن و همچنین تقویت کننده ی بالای مخزن وارد نشده است و هیچ گونه تغییر شکل ماندگاری در لبه ی بالایی مخزن به وجود نیامده و بعد از باربرداری لبه ی بالایی مخزن به

Archive of SID

۴. در نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده و با تقویت‌کننده، مود کمانش مخازن به صورت خطوط V شکل است. با این تفاوت که در نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده به علت تغییر مکان‌های خارج از صفحه‌ی لبه‌ی بالایی ارتفاع این خطوط در جداری مخزن نسبت به مخازن با تقویت‌کننده کمتر است. در نمونه با تقویت‌کننده به علت حضور تقویت‌کننده و جلوگیری از تغییر مکان خارج از صفحه‌ی لبه‌ی بالایی ارتفاع این موج‌ها تا لبه‌ی بالایی گسترش پیدا می‌کند.

۵. حضور تقویت‌کننده باعث افزایش مشخصه‌های چقرمگی، بیشینه‌ی بار معادل و سختی اولیه می‌شود به طوری که میزان افزایش چقرمگی، بیشینه‌ی بار اولیه و سختی اولیه در مخزن با تقویت‌کننده نسبت به مخزن بدون تقویت‌کننده به ترتیب برابر ۹۸٪، ۵۸٪ و ۱۰۱٪ است.

۶. نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیل عددی متناظر در تمام نمونه‌ها دارای تطابق بالایی است و اختلافات اندک موجود در نتایج این دو روش به علت وجود ناکاملی‌های هندسی، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی و غیره در نمونه‌ها است.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر تقویت‌کننده بر رفتار مخازن جدارنازک تحت اثر نشست موضعی در دو حالت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد و نتایجی به شرح زیر به دست آمد:

۱. از مقایسه‌ی نمودارهای آزمایشگاهی و عددی بار معادل - نشست مخزن بدون تقویت‌کننده و با تقویت‌کننده می‌توان نتیجه گرفت که رفتار هر دو مخزن تحت نشست موضعی به صورت غیرخطی است.

۲. حضور تقویت‌کننده نقش بسیار مهمی در کنترل تغییر مکان‌های شعاعی دارد. به طوری که با جلوگیری از تغییر مکان شعاعی لبه‌ی بالایی باعث افزایش ظرفیت کمانشی و پس‌کمانشی مخازن می‌شود.

۳. در نمونه‌ی بدون تقویت‌کننده معیار توقف آزمایش تغییر مکان‌های بیش از حد لبه‌ی بالایی مخزن است؛ در حالی که در نمونه با تقویت‌کننده به دلیل جلوگیری از تغییر مکان‌های بیش از حد لبه‌ی بالایی، معیار توقف، لهیدگی لبه‌ی پایینی و مچاله شدن آن است.

پانویس‌ها

1. Palmer
2. Hornang
3. Godoy
4. Holst
5. Zhao
6. Gong
7. Chen
8. ABAQUES

منابع (References)

1. API 653. "Tank inspection, repair, alteration and reconstruction", 1st edn American Petroleum Institute, Washington (1991).
2. ENV 1993-1-6. "Eurocode 3: Design of steel structures; part 1-6: general rules: Supplementary rules for shell structures", CEN, Brussels (1999).
3. ENV 1993-4-1 Eurocode 3. "Design of steel structures, Part 4.1: Silos, eurocode 3 part 4.1", CEN, Brussels (1999).
4. ECCS. "European recommendations for steel construction: Buckling of shells, 3rd edn", European Convention for Constructional Steelwork, Brussels (1988).

5. EEMUA. "Recommendation for in-service periodic inspection of aboveground vertical cylindrical steel storage tanks", 1st edn. Engineering Equipment and Materials Users Association, London, Publication (1959).
6. Palmer S.C. "Stresses in storage tanks caused by differential settlement", *Journal of Process Mechanical Engineering*, Proceedings of the IMechE Part E 208, pp. 5-16 (1994).
7. Hornung U. and Saal, H. "Stresses in unanchored tank shells due to settlement of the tank foundation", *Proceedings of the International Conference on Carrying Capacity of Steel Shell Structures*, Brno, pp. 157-163 (1997).
8. Godoy E.M., Sosa. "Localized support settlements of thin-walled storage tanks", *Thin-Walled Structures* 941-95 (2003).
9. Holst, J.M. and Rotter, J.M. "Axially compressed cylindrical shells with local settlement", *Thin-Walled Structures*, **43**, pp. 811-25 (2005).
10. Zhao, Y., Lei, X, Wang, Z. and et al. "Buckling behavior of floating-roof steel tanks under measured differential settlement", *Thin-Walled Struct*, **69**, pp. 70-80 (2013).
11. Gong, J., Zhou, Z.Q. and Xuan, F-Z. "Buckling strength of cylindrical steel tanks under measured differential", *Thin-Walled Structures 119PP*, pp. 345-355 (2017).
12. Gong J., Zeng, Sh. and Jin, T. "Effect of hydrostatic pressure on buckling behaviour of storage tanks under local support settlement", *Proceedings of the ASME*

Archive of SID

2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP 14-18, Paris, France

13. Gong J., Tao, T., Zhao, J. and et al. "Effect of top stiffening rings of open top tanks on critical harmonic settlement", *Thin-Walled Structures*, **65**, PP. 62-71 (2013).
14. Chen, Y., Ma, Sh., Dong, Sh. and et al. "Deformation of large steel tank under uneven foundation settlement", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 526 (2020) 012229.
15. Sullivan R.A. and Nowicki, J.G. "Differential settlements of cylindrical oil tanks", *Proceedings of the Conference on Settlement of Structures*, British Geotechnical Society, Cambridge, UK, pp. 420-424 (1974).
16. Tarasenko A.A., Konovalov, P.A. and Zekhniev, F.F. "Effect of nonuniform settlement of the outer bottom perimeter of a large tank on its stress-strain state", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **53**(6), pp. 405-411 (January 2017).